



## 南黄海中西部全新世地层沉积特征

仇建东, 张 勇, 吴凤萍, 王松涛, 程世秀, 张 龙, 王 伟

### Sedimentary characteristics of Holocene sediments in the Middle-Western South Yellow Sea

QIU Jiandong, ZHANG Yong, WU Fengping, WANG Songtao, CHENG Shixiu, ZHANG Long, and WANG Wei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2022070601>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 南黄海中部隆起晚新近纪—第四纪沉积序列的地层划分与沉积演化

Stratigraphic classification and sedimentary evolution of the late Neogene to Quaternary sequence on the Central Uplift of the South Yellow Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 25

#### 南黄海崂山隆起二叠系砂岩储层特征及其油气勘探前景

Characteristics and hydrocarbon prospects of the Permian sandstone reservoirs of the Laoshan Uplift, South Yellow Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 181

#### 全新世中国大河三角洲沉积演化模式转化及其对人类活动的响应

Changes of evolution models of China's large river deltas since Holocene and their responses to anthropogenic activities

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 77

#### 南薇西含油气盆地地层层序及生储盖组合特征

Characteristics of stratigraphic sequence and the source-reservoir-cap assemblages in the Nanweixi petroliferous basin

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 163

#### 南海北部神狐海域SH37岩芯浊流沉积及其物源分析

Turbidity deposits and their provenance: evidence from core SH37 in Shenhu area of the South China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 101

#### 北黄海盆地东部坳陷中生界次生孔隙的发育规律

Development of Mesozoic secondary pore zones in the Eastern Depression of North Yellow Sea Basin

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 194



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

仇建东, 张勇, 吴凤萍, 等. 南黄海中西部全新世地层沉积特征 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2023, 43(2): 77-91.

QIU Jiandong, ZHANG Yong, WU Fengping, et al. Sedimentary characteristics of Holocene sediments in the Middle-Western South Yellow Sea[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2023, 43(2): 77-91.

## 南黄海中西部全新世地层沉积特征

仇建东<sup>1,2,3</sup>, 张勇<sup>1</sup>, 吴凤萍<sup>4</sup>, 王松涛<sup>2,3</sup>, 程世秀<sup>2,3</sup>, 张龙<sup>2,3</sup>, 王伟<sup>4</sup>

1. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266237

2. 山东省地矿局海岸带地质环境保护重点实验室, 潍坊 261021

3. 山东省第四地质矿产勘查院, 潍坊 261021

4. 山东省第三地质矿产勘查院, 烟台 264004

**摘要:**南黄海是典型的物源供给丰富的宽广陆架海, 全新世沉积记录十分丰富, 具有分辨率高、空间分布不连续和沉积记录片段性等特征。根据近年来在南黄海采集的大量高分辨率浅地层剖面资料, 结合多个钻孔的岩性特征和 AMS<sup>14</sup>C 测年数据, 较为系统精细地揭示了南黄海全新世沉积的时空分布特征。根据沉积体空间分布范围、成因机制和物质来源, 南黄海全新世沉积可划分为 4 个独立的沉积体, 呈现出不同的声学反射特征, 主要为加积进积反射、平行或透明弱反射、中高角度进积反射和中高角度倾斜-斜交反射。根据估算, 河流物质输入约占到南黄海全新世沉积总量的 78%, 其他物质来源主要为海侵过程中较强的海洋动力侵蚀、改造和再分配的底床物质。本文的研究可为厘清南黄海全新世沉积体精细演化过程的动力学机制研究提供更多可靠的证据。

**关键词:**声学反射; 物源分析; 地层分布; 全新世; 南黄海

中图分类号: P736

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2022070601

### Sedimentary characteristics of Holocene sediments in the Middle-Western South Yellow Sea

QIU Jiandong<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Yong<sup>1</sup>, WU Fengping<sup>4</sup>, WANG Songtao<sup>2,3</sup>, CHENG Shixiu<sup>2,3</sup>, ZHANG Long<sup>2,3</sup>, WANG Wei<sup>4</sup>

1. Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266237, China

2. Key laboratory of coastal zone geological environment protection, Shandong geology and mineral exploration and development bureau, Weifang 261021, China

3. Exploration Institute of Geology and Mineral Resources, Weifang 261021, China

4. Exploration Institute of Geology and Mineral Resources of Shandong Province, Yantai 264004, China

**Abstract:** The South Yellow Sea is a typical wide continental shelf sea with abundant terrestrial sediment supply. A variety of sedimentary records have been formed since the Holocene period, and they have characteristics in terms of high resolution, discontinuous spatial distribution, and depositional hiatus. Based on abundant high-resolution shallow seismic profiles acquired in the South Yellow Sea in recent years and combined with lithologic characteristics and AMS<sup>14</sup>C dating data of several cores, the spatial and temporal distribution of Holocene sediments in the South Yellow Sea were revealed systematically and meticulously. According to their spatial distribution, genetic mechanism and provenance, the Holocene sediments in the South Yellow Sea were divided into four independent sedimentary bodies, which show different acoustic reflection characteristics, including mainly accretion and aggradation reflection, parallel or transparent weak reflection, medium or high angle accretion reflection, and medium-high angle tilt-oblique reflection. By estimation, the river sediment input accounted for 78% of the Holocene sediments in the South Yellow Sea, and the other sources were mainly the bottom bed materials from strong marine dynamic erosion, transformation, and redistribution during transgression. The study is expected to provide more-reliable evidence for the research of dynamic mechanism of sedimentary evolution process of Holocene deposits in the South Yellow Sea.

**Key words:** acoustic reflection; provenance analysis; stratigraphic distribution; Holocene; South Yellow Sea

资助项目: 中国地质调查局项目 (DD20230071, DD20221724, GZH200900501, 200211000001, 1212010611401, GZH201200506, DD20160145, DD20190276, GZH201400205, GZH200800501); 山东地矿局海岸带地质环境保护重点实验室开放基金 (SYS202104); 山东地矿三院科技创新基金 (SYKJ-202207)

作者简介: 仇建东 (1983—), 男, 博士, 主要从事海洋地质与第四纪地质研究工作, E-mail: jiandongqiu@163.com

通讯作者: 王松涛 (1971—), 男, 主要从事水工环地质和海洋地质研究工作, E-mail: sdwfwst@163.com

收稿日期: 2022-07-06; 改回日期: 2022-11-02. 张现荣编辑

全新世是与人类关系最为密切的地史时期,是认识地质历史的重要窗口,查明这一时期海洋沉积物沉积特征和气候演化规律,不仅可以丰富地质理论,而且可为预测未来气候和环境变化提供基础数据支撑<sup>[1-4]</sup>。

南黄海是西太平洋典型的半封闭陆架浅表海(图1)。地质构造上,新近纪以来,南黄海持续沉降<sup>[5-6]</sup>。全新世以来,宽广的陆架环境、丰富的物源供给和复杂的沉积动力环境,使得南黄海保存了十分丰富的全新世沉积记录,并且具有分辨率高、空间分布不连续和沉积记录片段性等特征。以往通过对山东半岛沿岸楔形沉积体<sup>[7-8]</sup>、南黄海中部泥质沉积体<sup>[9-10]</sup>、南黄海东侧泥质沉积体<sup>[11]</sup>、老黄河水下三角洲<sup>[12-13]</sup>、苏北潮流沙脊<sup>[14-15]</sup>等研究,对南黄海全新世沉积已有了较为充分的认识,但受研究区域范围和资料的限制,对南黄海全新世沉积尚缺少系

统、全面的总结,从而在分析南黄海全新世沉积环境演化、沉积物物源、沉积动力环境时具有一定的局限性。

本文收集整理了青岛海洋地质研究所最近20年在南黄海中西部调查获取的大量高分辨率浅地层剖面资料,结合地质钻孔数据,全面揭示南黄海中西部全新世沉积特征,在分析物源和成因机制的基础上,对沉积体进行了划分,计算了沉积物总量及其河流物质的贡献。本次研究对于了解南黄海海陆相互作用、长江和黄河物质源汇过程、南黄海陆架物质通量和沉积演化有着重要的科学意义。

### 1 材料和方法

本次研究使用的浅地层剖面资料总共约26 600 km(图2),主要包括:① 2000—2002年在南

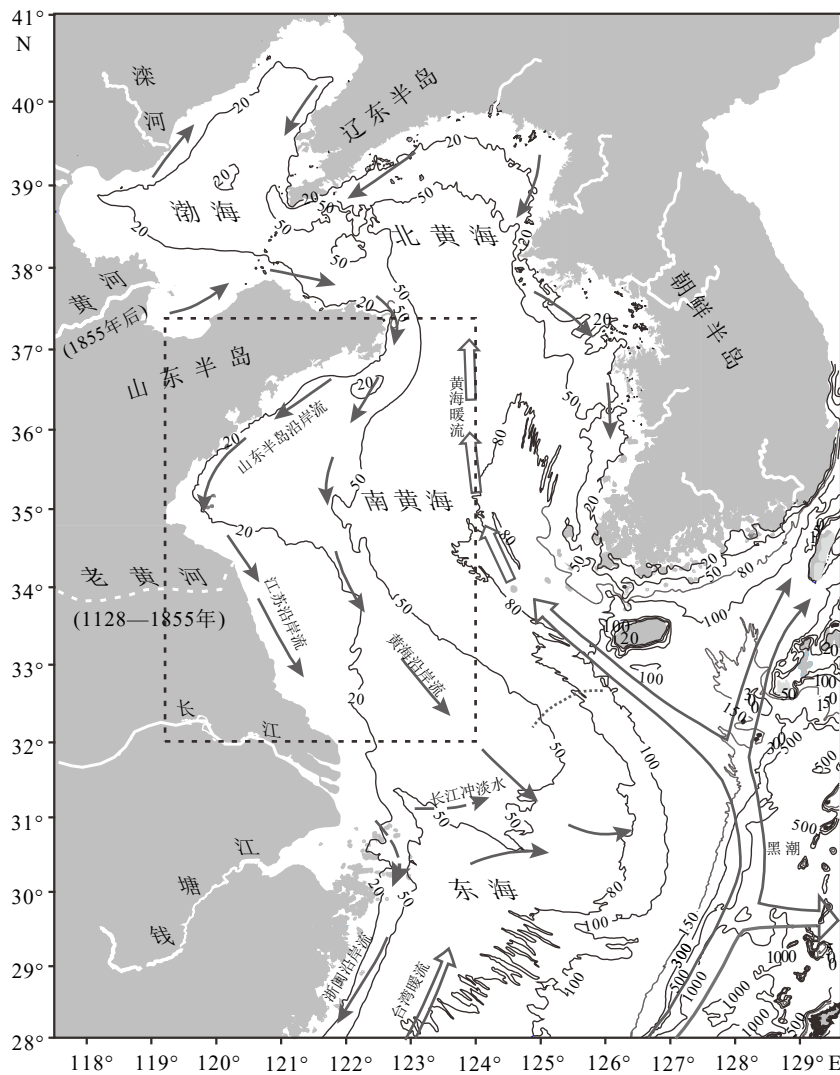


图1 研究区范围、水深地形和潮流流系图

Fig.1 The study area, bathymetric topography, and tidal current systems

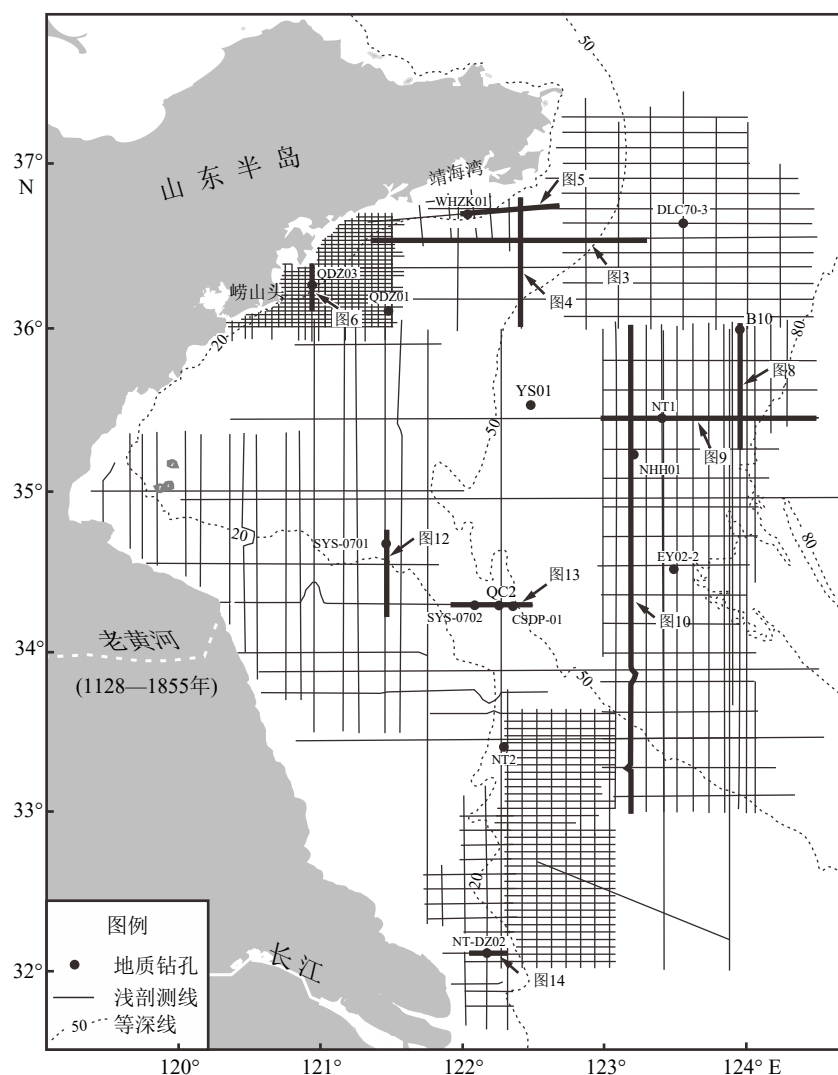


图 2 研究区浅地层剖面测线、钻孔位置和典型剖面位置

Fig.2 Shallow stratigraphic profiles, boreholes, and typical profile locations in the study area

黄海水域获得的 4 000 km 高分辨率浅地层剖面资料; ② 2006 年在南黄海西部陆架区获得的 4 100 km 高分辨率浅地层剖面资料; ③ 2009 年在山东半岛东南部海域获得的 4 000 km 高分辨率浅地层剖面资料; ④ 2009 年在山东半岛南部近岸海域获得的 3 000 km 高分辨率浅地层剖面资料; ⑤ 2013 年在山东半岛南部靖海湾附近海域获得的 600 km 高分辨率浅地层剖面资料; ⑥ 2014—2015 年在苏北外海获得的 4 000 km 高分辨率浅地层剖面资料; ⑦ 2016 年在苏北潮流沙脊区获得的 900 km 高分辨率浅地层剖面资料; ⑧ 2017 年在南黄海中部海域获得的 6 000 km 高分辨率浅地层剖面资料。

为更好地进行浅地层剖面解释, 本次研究收集了该海区 15 个穿透全新世沉积、具有较好测年数据和研究程度较高的地质钻孔(表 1), 基于已有钻孔地质资料揭示的全新世地层埋深和厚度, 结合声

学反射界面识别标志(上超、下超、削截和顶超), 对穿过钻孔的剖面进行分层解释, 从钻孔中心位置向外沿主测线进行地层划分, 通过联络测线实现全区测线上所有地层反射界面闭合。通过统计声波到全新世沉积顶底界面的双程反射时间(ms)的差值, 采用 1 600 m/s 的平均声速值, 转换为每个炮点的厚度, 利用 Surfer 19 软件插值做出等厚图。

## 2 结果

根据南黄海中西部浅地层剖面地层反射特征和地震界面识别标志, 将研究区划分为 4 个区: 山东半岛东南部沉积区(图 3—7)、南黄海中部沉积区(图 8—11)、老黄河口沉积区(图 12)和苏北潮流沙脊沉积区(图 13—15)。



表1 本文利用和搜集到的钻孔  
Table 1 Information of the cores collected and used in this study

序号	钻孔编号	位置	钻孔获取时间	全新世厚度/m	文献来源
1	QC2	34.3°N、122.267°E	1984年	9.17	[16]
2	B10	35.995°N、123.9933°E	1998年	2.9	[17]
3	EY02-2	34.5°N、123.5°E	2001年	2.5	[18]
4	NT1	35.443°N、123.405°E	2002年	7.7	[19]
5	NT2	33.459°N、122.258°E	2002年	5.5	[20]
6	YS01	35.520°N、122.488°E	2006年	11	[8]
7	SYS-0701	34.663°N、121.45°E	2007年	9.69	[21]
8	SYS-0702	34.302°N、122.096°E	2007年	18.64	[21]
9	DLC70-3	36.636°N、123.543°E	2009年	0	[22]
10	NHH01	35.216°N、123.218°E	2009年	5.1	[23]
11	QDZ01	36.100°N、121.496°E	2011年	0	[24]
12	QDZ03	36.268°N、120.950°E	2011年	8.63	[25]
13	CSDP-01	34.3°N、122.367°E	2013年	3.4	[26]
14	WHZK01	36.7°N、122°E	2014年	14.91	[27]
15	NT-DZ02	32.067°N、122.117°E	2016年	19.12	[28]

## 2.1 山东半岛东南部沉积区

根据浅地层剖面声学反射特征和界面识别标志,结合 QDZ03 孔、WHZK01 孔沉积相特征和 AMS<sup>14</sup>C 测年数据,本研究区全新世沉积可划分出 3 个地震界面,由下往上依次命名为 T1、MFS 和 T0 (图 3—6)。其中 T1 是全新世底界面,解释为冰后期随着海平面上升,临滨带向陆后退形成的区域性海侵面,也是冰后期初始海泛面,在地震剖面上易于识别,中强振幅,连续性好。根据 QDZ03 孔和 WHZK01 孔 AMS<sup>14</sup>C 测年数据(图 7),T1 是一个穿时面,大约形成于 10~11 ka。MFS 是全新世最大海泛面,因界面上下地层反射特征有所差异,且本区内全新世沉积厚度较大,该界面易于识别,界面以下地层主要呈平行、亚平行反射,界面以上主要为进积、加积反射。根据钻孔测年数据,MFS 形成时间约为 6~7 ka,在 QDZ03 孔和 WHZK01 孔中存在沉积间断。T0 为海底面,在近岸受“Ω”形沉积和楔形沉积影响,起伏较大。

在山东半岛东南部,全新世沉积体呈“Ω”形特征<sup>[7]</sup>(图 3、4),向陆向海尖灭,QDZ01 孔和 DLC70-3 孔缺失全新世沉积。“Ω”形沉积体被 MFS 分为 SU 1-1 和 SU 1-2 两个地震单元,SU 1-1 表现为向陆和向海的加积反射,内部反射层下超于 MFS 界面,局

部反射层变形(图 3、5),最大厚度超过 30 m。SU 1-2 主要表现为平行、亚平行反射,局部地层上超于 T1 界面(图 5),最大厚度超过 12 m。

在靖海湾近岸海域,“Ω”形沉积体与山东半岛南部近岸楔形<sup>[24-25]</sup>沉积相连(图 5),连接处相比近岸的楔形沉积和远岸的“Ω”形沉积厚度较薄,厚约 7 m。连接处西南向海方向,楔形沉积与“Ω”形沉积分离,如 QDZ01 孔全新世厚度为 0 m。

山东半岛南部近岸,全新世沉积呈楔形沉积(图 6),分布于现今水深 25 m 等深线以浅的近岸海域<sup>[25]</sup>,被 MFS 划分为两个地震单元,SU 1-1 表现为向南、向东的进积反射结构,内部反射层下超于 MFS 界面,向海尖灭,最大厚度超过 15 m。QDZ03 孔和 WHZK01 孔沉积物显示 SU 1-1 主要为深灰、绿灰色黏土质粉砂,岩性较均一。SU 1-2 主要为近似水平反射,厚度较薄,普遍小于 3 m,沉积物岩性主要为绿灰、黄灰色黏土质粉砂夹粉砂-细砂质线理、透镜体,底部为贝壳碎片砾石层。

## 2.2 南黄海中部沉积区

在南黄海中部,根据地层反射特征和 YS01 孔、NHH01 孔、B10 孔(图 11)测年数据,可识别 T0 和 T1 反射界面,无法识别全新世最大海泛面(MFS)。T0 和 T1 界面之间的全新世沉积 SU 1 地震单元主

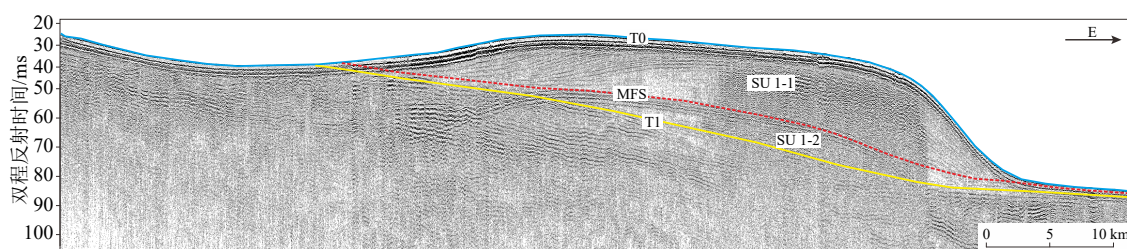


图 3 山东半岛东南部“Ω”形沉积 EW 向典型剖面

Fig.3 A typical east-west Ω-shaped profile in the southeast of Shandong Peninsula

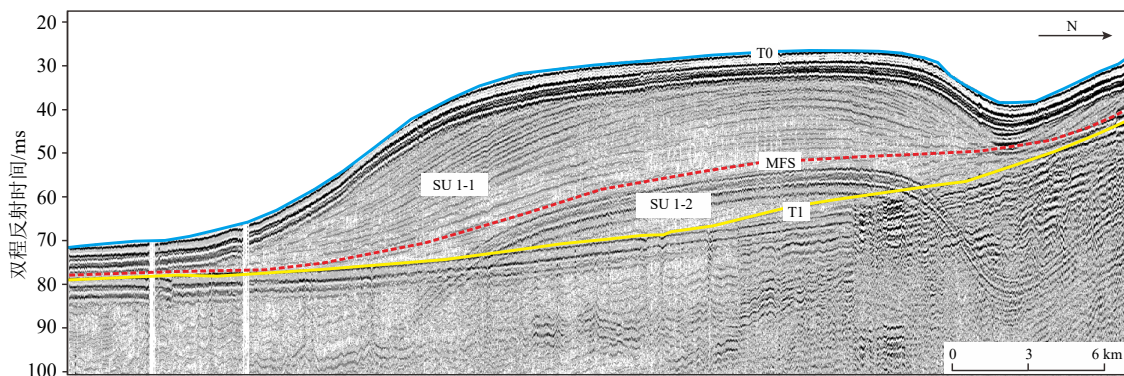


图 4 山东半岛南部“Ω”形沉积 NS 向典型剖面

Fig.4 A typical north-south Ω-shaped profile in the southeast of Shandong Peninsula

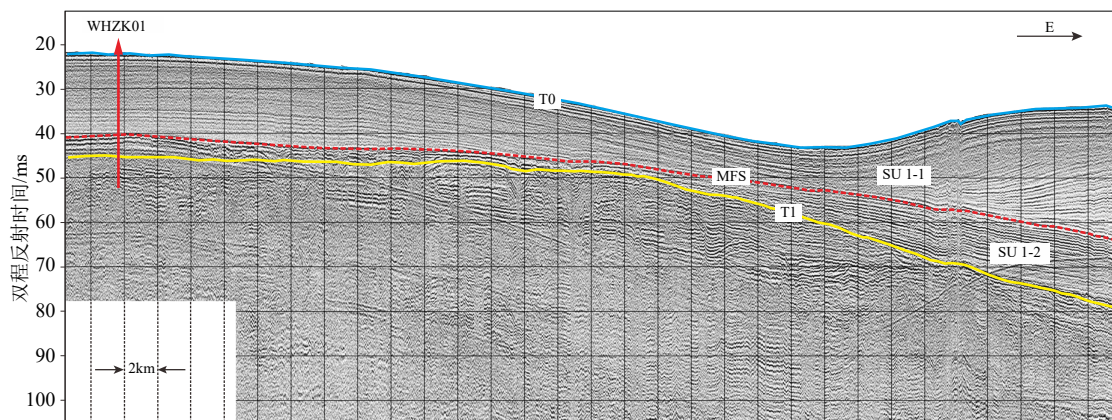


图 5 山东半岛南部靖海湾近岸海域泥质沉积 EW 向典型剖面

Fig.5 A typical east-west profile of mud deposit in the south of Shandong Peninsula

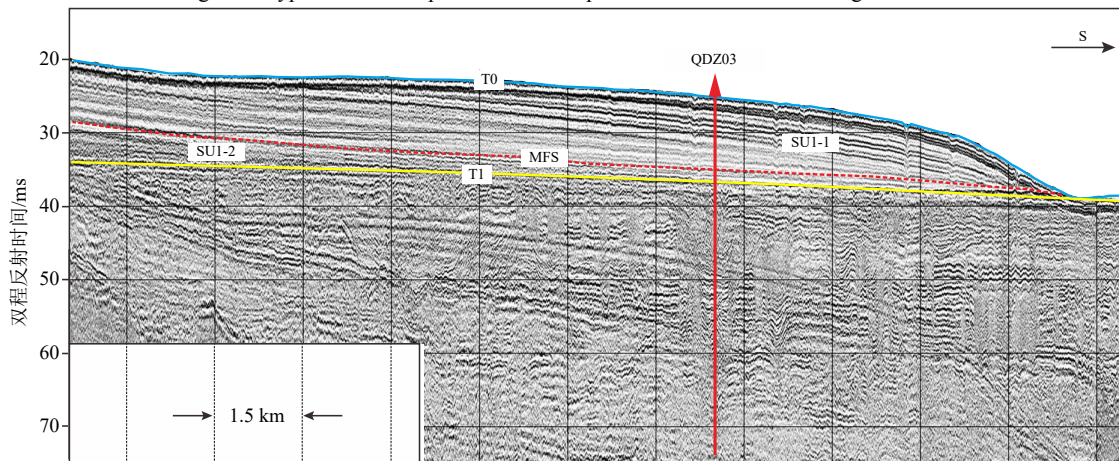


图 6 山东半岛南侧近岸楔形沉积 NS 向典型剖面

Fig.6 A typical north-south clinoform-shaped profile of mud deposit in the south of Shandong Peninsula



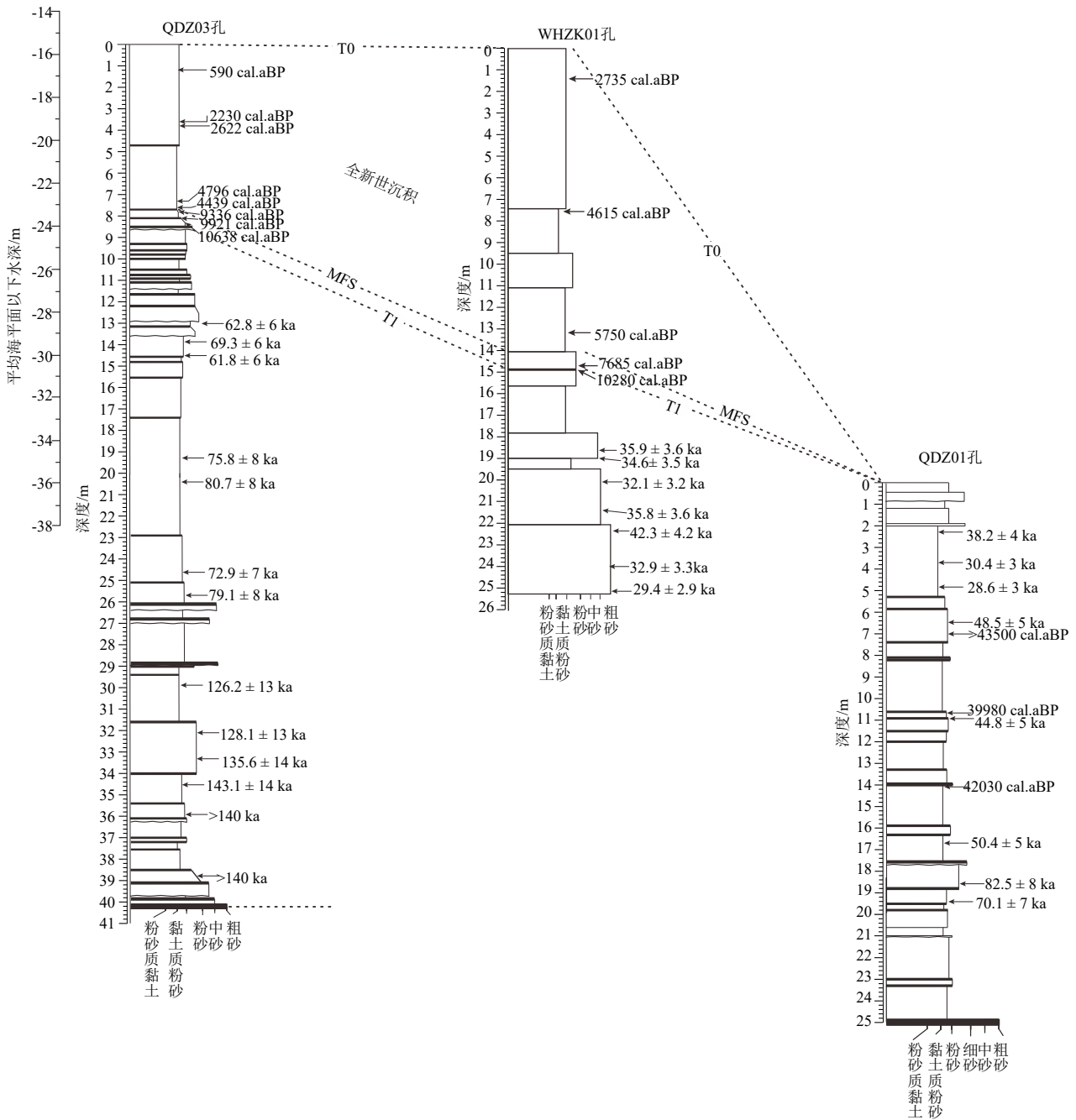


图7 山东半岛东南部钻孔岩芯综合地层对比图<sup>[24-25]</sup>

Fig.7 Stratigraphic correlations amongst borehole cores in the southeast of Shandong Peninsula <sup>[24-25]</sup>

要表现为平行弱反射、低频率、弱振幅(图8、9),局部为透明反射层或S型前积层<sup>[23]</sup>(图10),横向可连续追踪。总体上,南黄海中部全新世泥质沉积呈丘状外形,沉积厚度从中心向四周递减(图16),沉积中心位于35°30'N、122°30'E附近,厚达12 m。全新世泥质沉积体向东北、东、东南方向尖灭,北侧与“Ω”形沉积体相连,但沉积厚度并非从“Ω”中心由北向南递减,连接处的厚度比北侧的“Ω”形沉积体和南侧的南黄海沉积中心薄,南侧与老黄河水下三角洲和苏北潮流沙脊隔离(图10),西侧全新世

沉积厚度较薄,致使南黄海中心泥质沉积体呈丘状外形,是一个独立的沉积体。

YS01孔中全新世沉积为灰色黏土质粉砂,自上而下颗粒逐渐变粗,含少量贝壳碎片,偶见细沙纹层,底部年龄约为9.7 ka<sup>[8]</sup>。NHH01孔中全新世沉积为灰色黏土,块状构造、质软,分选好,可见有孔虫个体和贝壳碎片,局部夹粉砂<sup>[23]</sup>。B10孔全新世沉积为灰色黏土质粉砂<sup>[17]</sup>,所有钻孔都揭示南黄海中全新世沉积以细粒沉积物为主。

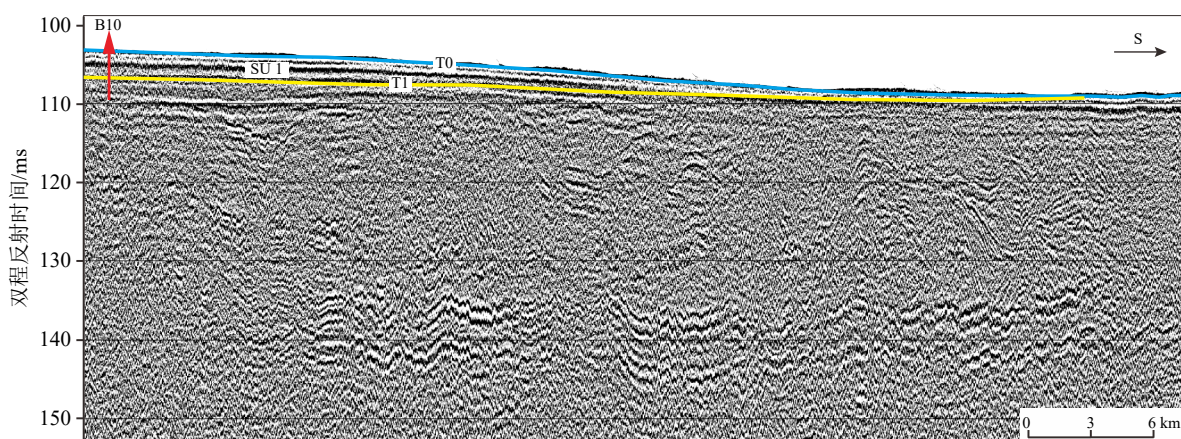


图 8 南黄海中部泥质沉积 NS 向典型剖面

Fig.8 A typical north-south profile of mud deposit in the middle of south Yellow Sea

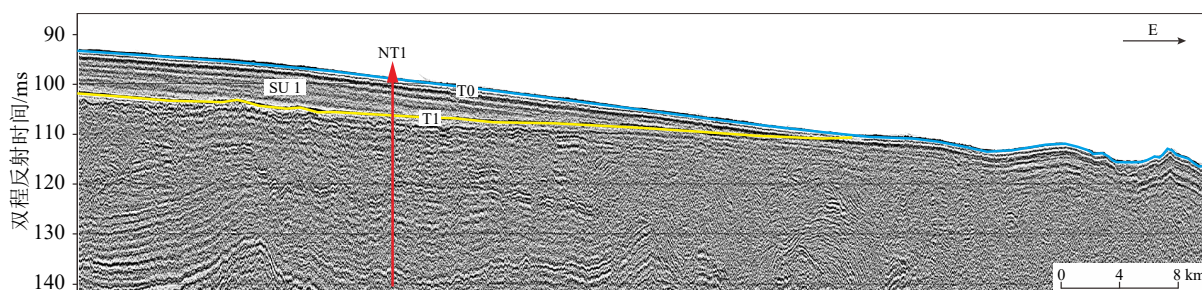


图 9 南黄海中部泥质沉积 EW 向典型剖面

Fig.9 A typical east-west profile of mud deposit in the middle of south Yellow Sea

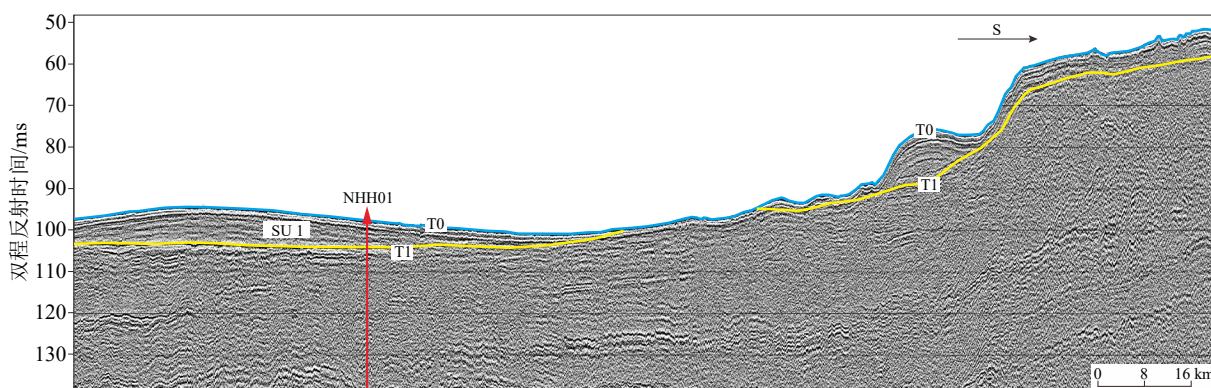


图 10 南黄海中部泥质沉积 NS 向典型剖面

Fig.10 A typical north-south profile of mud deposit in the middle of south Yellow Sea

### 2.3 老黄河水下三角洲沉积区

根据浅地层剖面地层反射特征和 SYS-0701 孔测年数据, 老黄河口全新世沉积主要为 1128—1855AD 形成的水下三角洲沉积, 剖面上可清晰识别出 T1 界面, 内部反射层缓倾-陡倾、高振幅下超至 T1 界面上。T0 与 T1 界面之间的 SU1 地震单元是呈楔形沉积的复合三角洲体系, 由近岸三角洲和远端水下三角洲组成(图 12), 近岸三角洲包括三角洲平原和三角洲前缘, 三角洲前缘沉积在 17 m 水

深线以内, 地层反射层倾角小于 0.3°, 远端水下三角洲由宽阔的、轻微倾斜的顶积层和相对较窄和陡峭的前积层构成, 向海延伸约 160 km 并向南偏转, 相对于老黄河口, 形态上不对称。水下三角洲顶积层位于水深 10~25 m, 宽约 25~100 km, 厚度一般小于 4 m, 前积层在 10~45 m 水深线, 比顶积层窄, 但厚度大, 多为 4~16 m, 最厚可达 20 m, 宽约 5~30 km, 地层倾角较陡, 约为 0.3°~0.5°, 顶积层和前积层的过渡带大多位于 10~25 m 水深<sup>[12]</sup>。水下三角洲的东侧和南侧紧邻着苏北潮流沙脊沉积(图 16)。



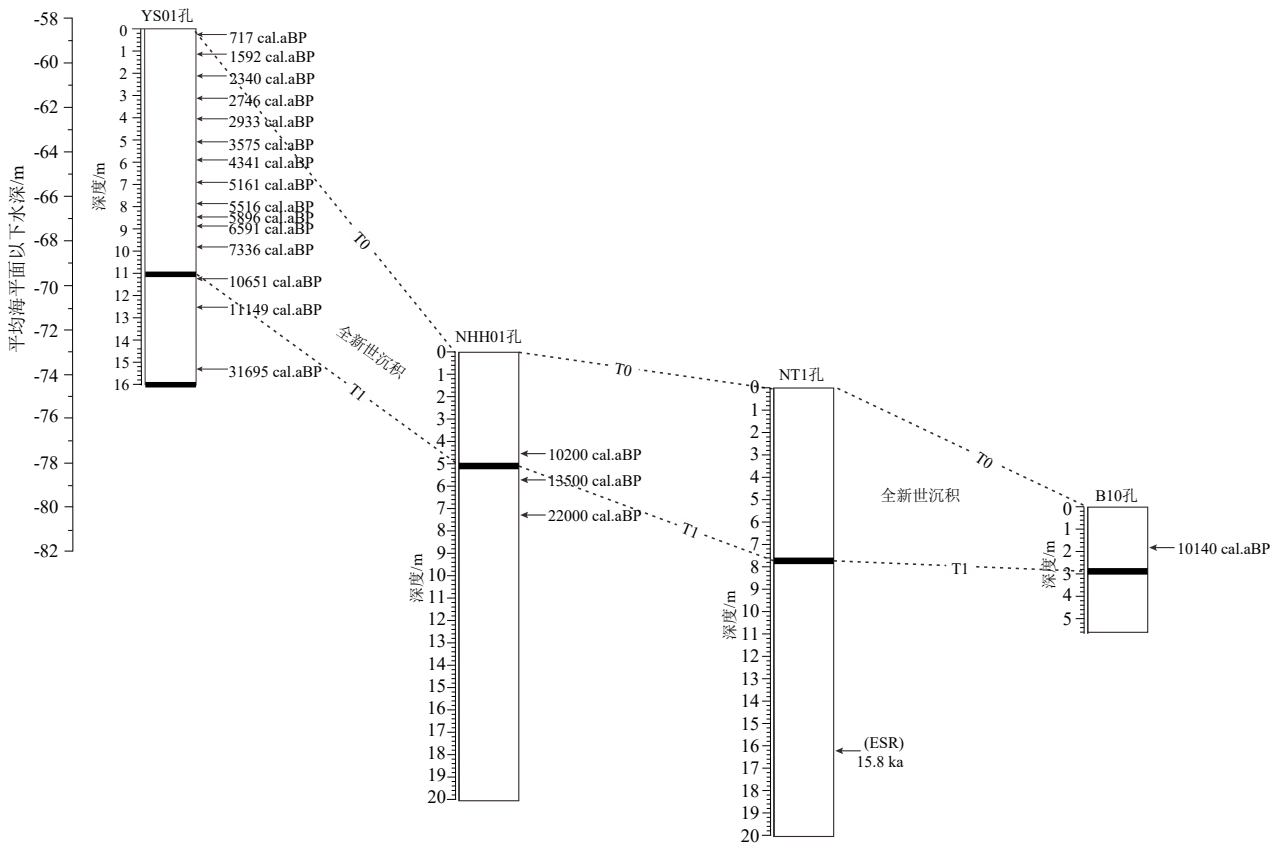


图 11 南黄海中部钻孔岩芯综合地层对比图 [8, 17, 19, 23]

Fig.11 Stratigraphic correlations amongst borehole cores in the central of South Yellow Sea [8, 17, 19, 23]

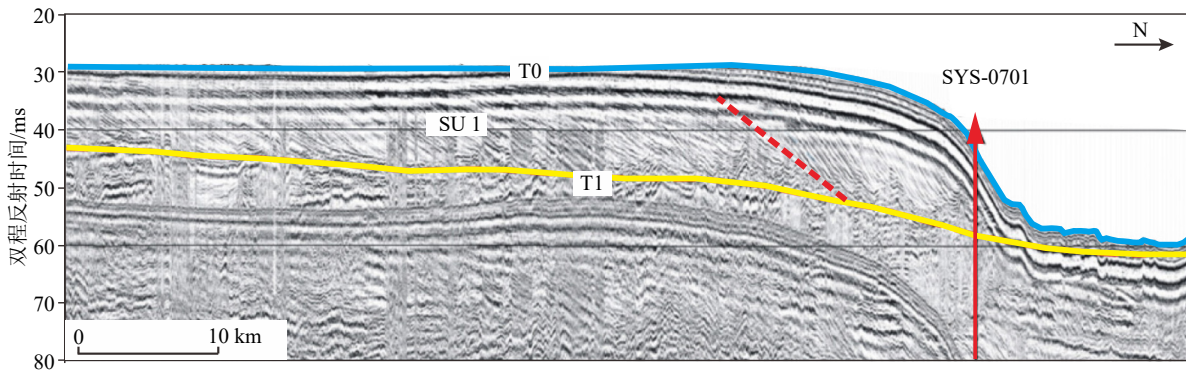


图 12 老黄河水下三角洲楔形沉积 NS 向典型剖面 [12]

Fig.12 A typical north-south clinoform-shaped profile of subaqueous delta in the Old Yellow River [12]

SYS-0701 孔钻孔沉积物显示三角洲底部由灰色-黄灰色、分选较好的细砂组成, 中上部从黏土质粉砂向上变为粉砂、粉砂质细砂和细砂, 4 个 AMS<sup>14</sup>C 年龄为 276~529 cal.aBP, 为晚全新世沉积 (图 15)。

### 2.4 苏北潮流沙脊沉积区

浅地层剖面上苏北潮流沙脊最有代表性的特征为脊、槽相间和斜层理、斜交层理或交错层理等 (图 13、14)。根据地层反射特征和 NT-DZ02 孔、SYS-0702 孔 AMS<sup>14</sup>C 测年数据, 苏北潮流沙脊区全

新世底界面 T1 是一个略有起伏的侵蚀面, 易于识别。在中-高角度的倾斜或 S 型反射结构的地震剖面上, 无法识别 MFS 或次一级的反射界面 (图 13), 在具有斜交层理或交错层理的地震剖面上, 可识别出多个次一级反射界面, 但在区域内无法连续追踪, 主要反映了潮流沙脊发育的阶段性的 (图 14)。

NT-DZ02 孔显示全新世沉积主要以深灰、绿灰细砂为主, 夹黏土质条带, 局部黏土质粉砂, 夹大量的粉细砂质斑点、透镜体, 可见贝壳碎片, AMS<sup>14</sup>C 测年数据表明该处潮流沙脊形成贯穿于整个全新



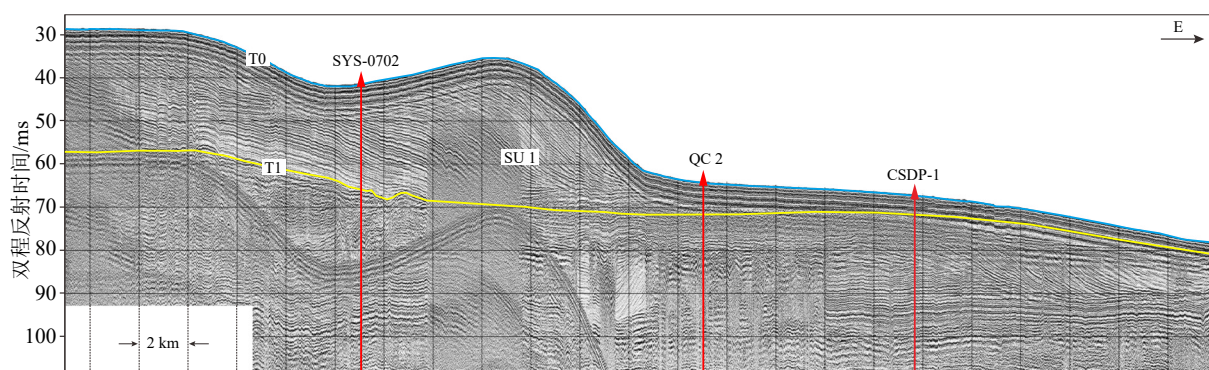


图 13 苏北潮流沙脊 EW 向典型剖面

Fig. 13 A typical east-west profile of tidal sand ridge in the northern Jiangsu Province

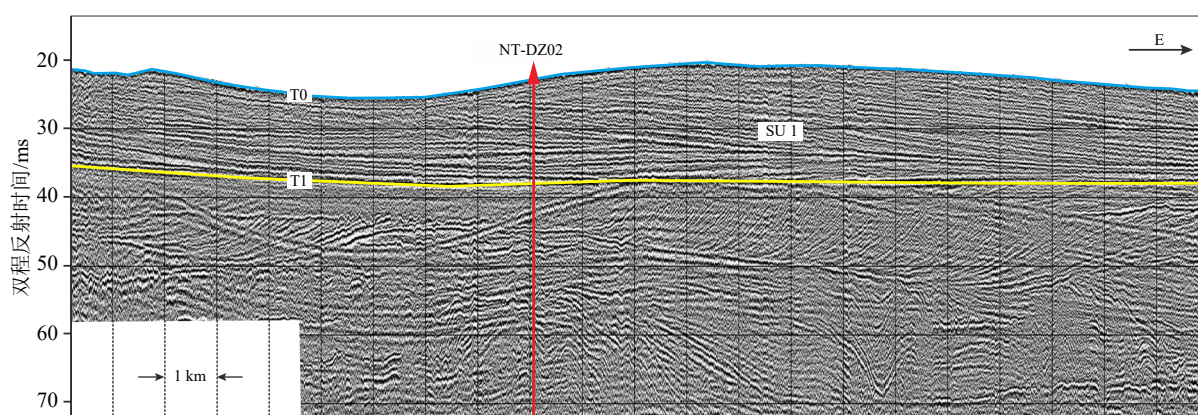


图 14 苏北近岸潮流沙脊 EW 向典型剖面

Fig. 14 A typical east-west profile of tidal sand ridge in northern Jiangsu Province

世, 测年序列较好, 无沉积间断<sup>[28]</sup>。

## 2.5 地层反射特征和全新世地层分布特征

南黄海中西部全新世沉积顶界面是代表海底的强反射界面(T0), 底界面是一个强反射的区域性海侵面, 也是冰后期初始海泛面(T1), 两个界面之间的地震单元 SU 1 在 4 个沉积区呈现出不同的声学反射特征, 在山东半岛东南部, 可被全新世最大海泛面(MFS)细分为上下两个亚单元, 上部亚单元为加积、进积反射, 下部亚单元为平行、亚平行反射。在其他 3 个区, 无法识别最大海泛面, 在南黄海中部, SU 1 主要表现为平行弱反射、低频率、弱振幅, 局部为透明反射层或 S 型前积层, 在老黄河水下三角洲沉积区表现为中高角度进积反射, 在苏北潮流沙脊沉积区表现为中-高角度的倾斜、S 型、斜交反射。

根据南黄海中西部大量的浅地层剖面资料和多个钻孔数据, 利用时深转换关系(声速采用 1 600 m/s), 计算了南黄海中西部 T1 界面以上的地层厚度, 即全新世地层厚度(图 16), 从图中可以看出, 全新世沉积可分为 4 个区, 山东半岛东南部沉

积区、南黄海中部沉积区、老黄河水下三角洲沉积区和苏北潮流沙脊沉积区, 较为详细地绘制了 4 个区内全新世沉积的分布范围、沉积厚度。南黄海中西部全新世沉积具有空间分布不连续特点, 大致以 35°N 为界, 北侧山东半岛东南部全新世“Ω”形沉积、近岸楔形沉积与南黄海中部丘状沉积相连, 但又是两个相对独立的个体。南侧老黄河水下三角洲沉积和苏北潮流沙脊沉积相连, 但成因上也是相对独立的个体, 形成时间上也迥异。

在各个全新世沉积区之间存在侵蚀区, 如在青岛崂山头以东 27~32 m 海域, 发育陆架侵蚀地貌<sup>[29]</sup>, 全新世沉积缺失, QDZ01 孔中全新世厚度为 0 m<sup>[24]</sup>。南黄海中西部, 70 m 等深线以深, 为侵蚀堆积地貌, 同样缺失全新世沉积<sup>[29]</sup>。

## 3 讨论

### 3.1 物源分析

南黄海中西部 4 个沉积体在分布上即相互独立, 在物源和成因机制上又有一定的关联性<sup>[29-30]</sup>。

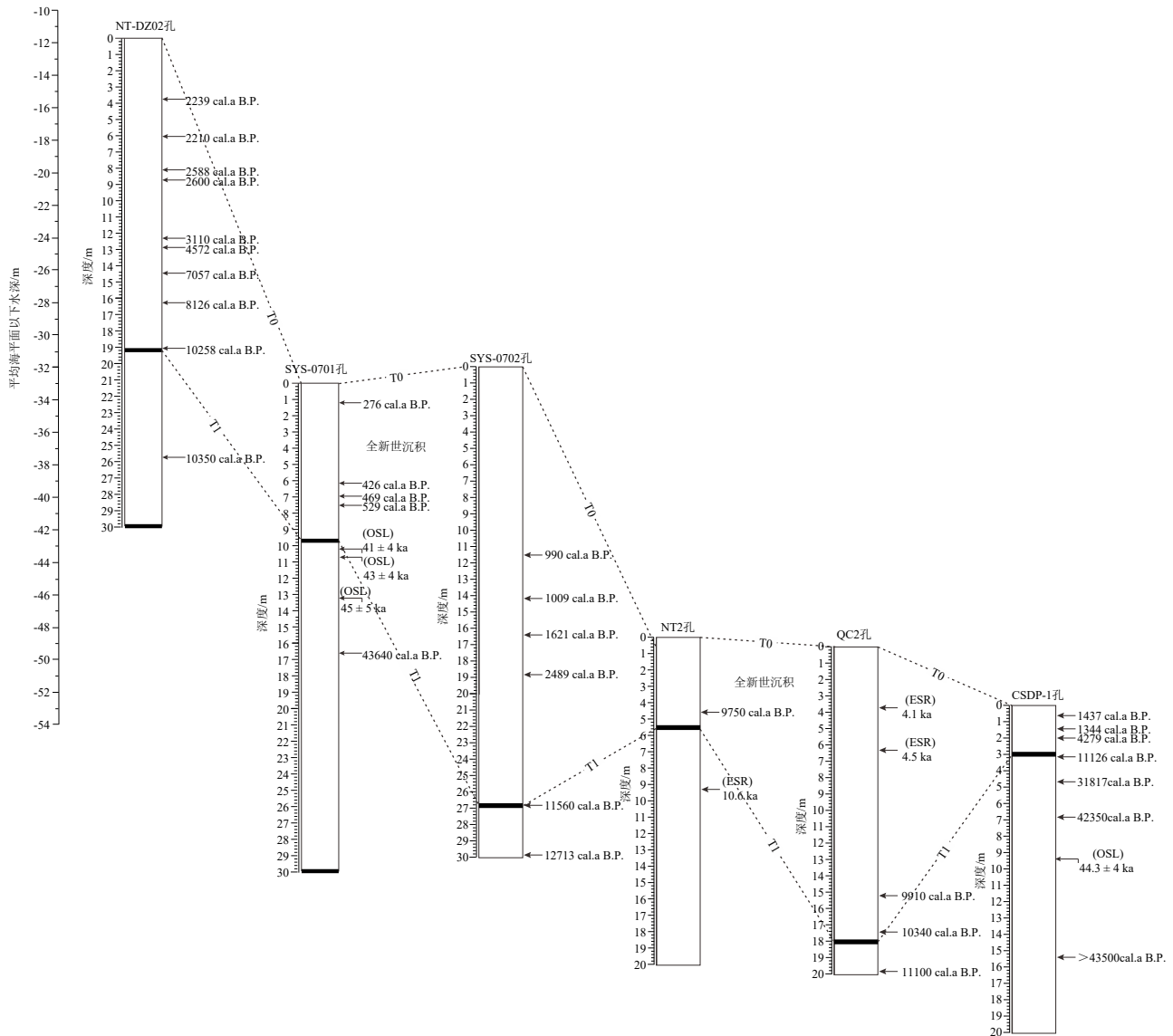


图 15 老黄河三角洲和苏北潮流沙脊钻孔岩芯综合地层对比图 [12, 21, 28]

Fig.15 Stratigraphic correlations amongst borehole cores in the Old Yellow River and tidal sand ridge along Jiangsu coast [12, 21, 28]

钻孔和表层沉积物矿物和地球化学元素特征都已证实山东半岛东部“Ω”沉积体物源主要为黄河沉积物,其他来源包括近源小河流和海岸侵蚀[7,31-32]。山东半岛东部“Ω”形沉积体被全新世最大海泛面(MFS)划分为两个地震单元,与山东半岛北部形成于9.6~11.6 ka BP、6.5~9.6 ka BP和6.5 ka BP至今的3个地震单元[33]的划分有一定的区别,山东半岛北部全新世内部界面无法区域追踪,这可能与黄河口的变迁、黄河沉积物在山东半岛沿岸的沉积、悬浮和再搬运过程有关。SU 1-2单元形成于全新世高海面之前,黄海类似现代的环流格局尚未出现,黄河沉积物被强度超过现今的潮流带入南黄海,开始堆积于山东半岛东南部近岸海区,但沉积速率相对较低,沉积厚度较薄。全新世最大海泛面之后,

随着黄海暖流的出现,黄海现代环流格局形成,沿岸流携带大量黄河物质沉积在山东半岛东南近岸,形成了“Ω”型的主体单元SU 1-1,最大厚度超过30 m。QDZ03孔黏土矿物、地球化学特征和WHZK01孔的碎屑矿物特征[25, 27]证实青岛近岸楔形沉积主要是在现代黄河物质和近岸中小河流物质共同作用下形成(图 17),但相比山东半岛东部的“Ω”形沉积,近源小河流的沉积作用进一步增强,因为在靖海湾海域、五龙河河口形成了相对独立的沉积中心,推测主要由湾内河流沉积物组成[25]。

南黄海中部泥质沉积已有大量研究,但对其物源仍有争议,有认为是现代黄河和苏北老黄河物质,有认为是多源的,包括现代黄河物质、苏北老黄河物质、长江物质、朝鲜半岛河流物质和外海物

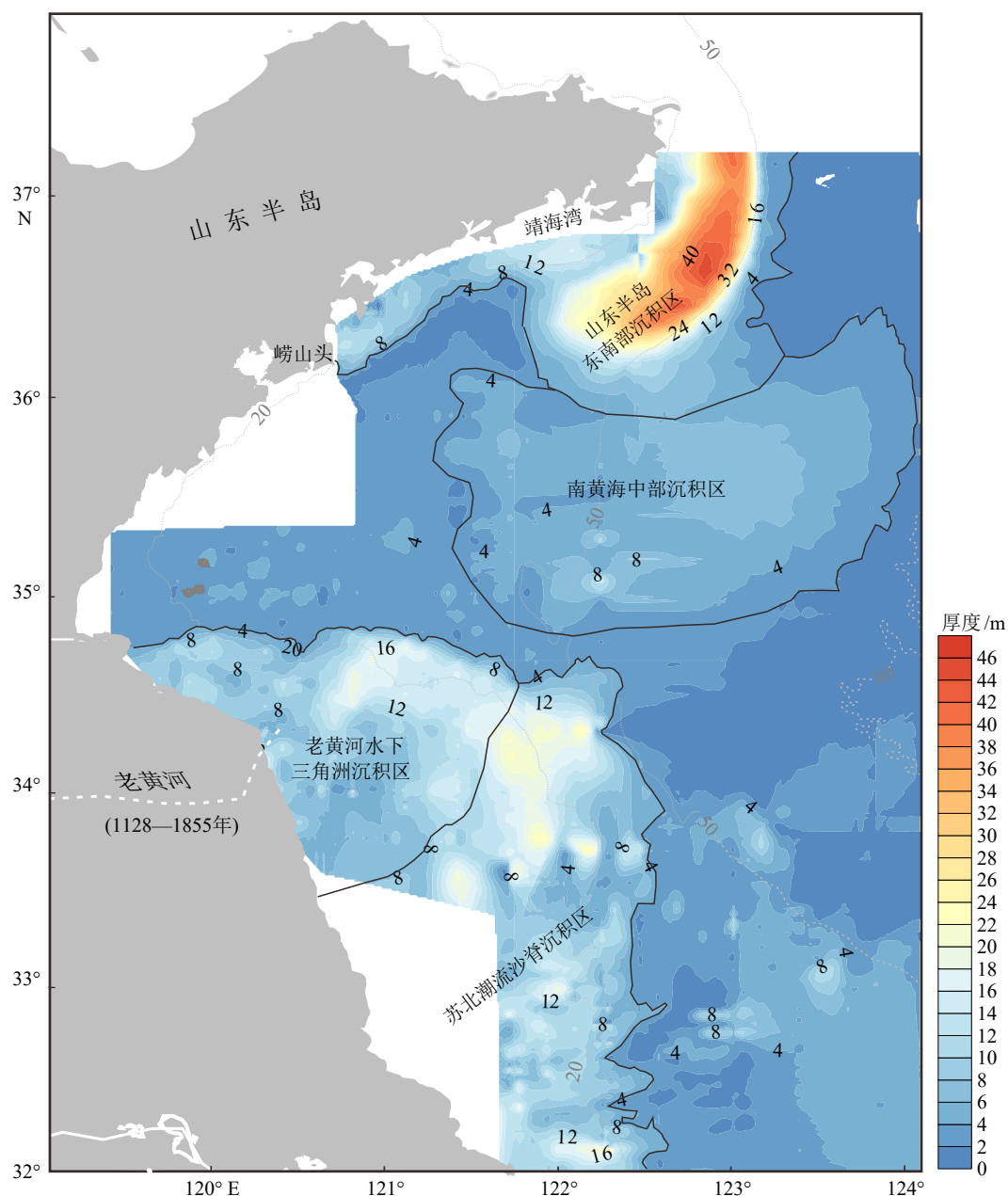


图 16 南黄海中西部全新世沉积物厚度

Fig.16 Holocene sediment thickness in the middle-western South Yellow Sea

质,也有认为是沿岸流携带的现代黄河和苏北老黄河物质,而长江和朝鲜半岛河流物质供应有限<sup>[34]</sup>。Wang 等<sup>[35]</sup>认为长江、黄河和其他河流物质供应占沉积体的 48%,其他物质来自冰消期潮流对老地层的侵蚀作用,并且潮流、上升流和冷水团对泥质体的形成具有重要作用,而与黄海暖流没有直接关系。石学法等<sup>[9]</sup>认为泥质区的形成与气旋型环流系统控制下的低能环境有关。也有研究认为,潮致余流是中部泥质区形成的重要原因,冷水团起到了对细颗粒物质的捕获作用,而沉积中心的形成则与 50 m 等深线处的上升流以及沿岸流和黄海暖流的切变带有关<sup>[36]</sup>。总之,南黄海中部泥质沉积与山东半岛

东南部“Ω”形沉积在物源上有较大差别,分布范围上相对独立,初步认为两者之间是一个侵蚀区,沉积厚度较薄。因此南黄海中部泥质沉积和山东半岛东南部“Ω”形沉积是两个独立的沉积体。

老黄河水下三角洲沉积主要是 1128—1855 年黄河南流入黄海时形成,形成时间较短,沉积厚度较大,主要来源为黄河沉积物<sup>[12]</sup>。老黄河三角洲东侧和南侧紧邻苏北潮流沙脊沉积(图 16)。

关于苏北潮流沙脊的物质来源,不同学者有不同的认识,主要有以下几种观点,①主要为现代长江口向北输沙与老黄河三角洲侵蚀来沙<sup>[37]</sup>;②古长江水下三角洲是其物质基础,后期受长江、老黄河,



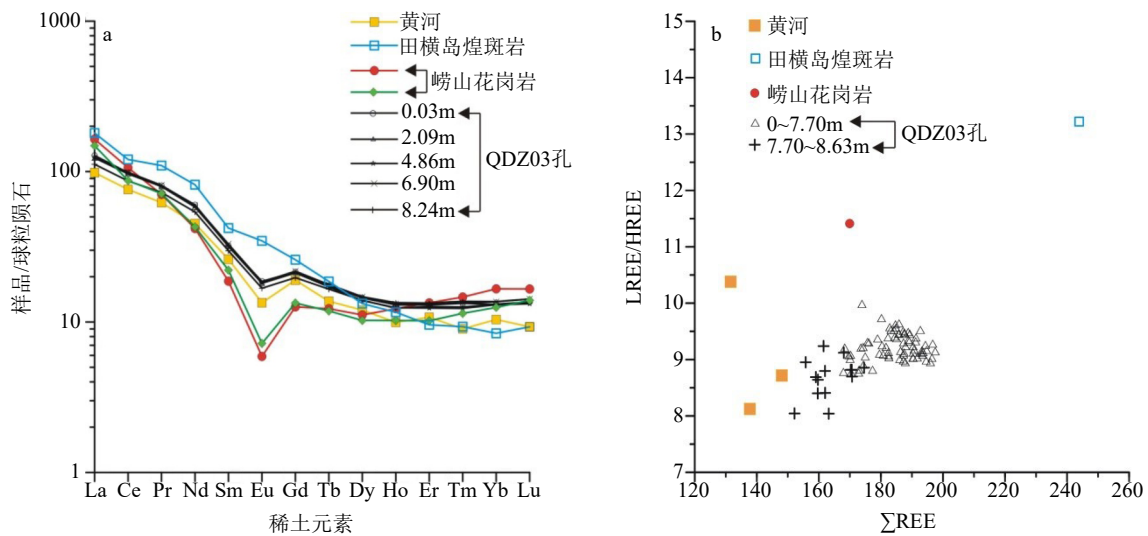


图 17 QDZ03 孔全新世岩心沉积物样品、黄河沉积物、崂山花岗岩及田横岛黄斑岩 REE 球粒陨石标准化配分模式 (a) 及其 REE 与 LREE/HREE 二元图 (b) [25]

Fig.17 Standardized REE chondrite partitioning model of Holocene core sediments from Well QDZ03, Yellow River sediments, Laoshan granite, and Tianhengdao lamprophyre (a) and the binary diagrams of REE and LREE/HREE (b) [25]

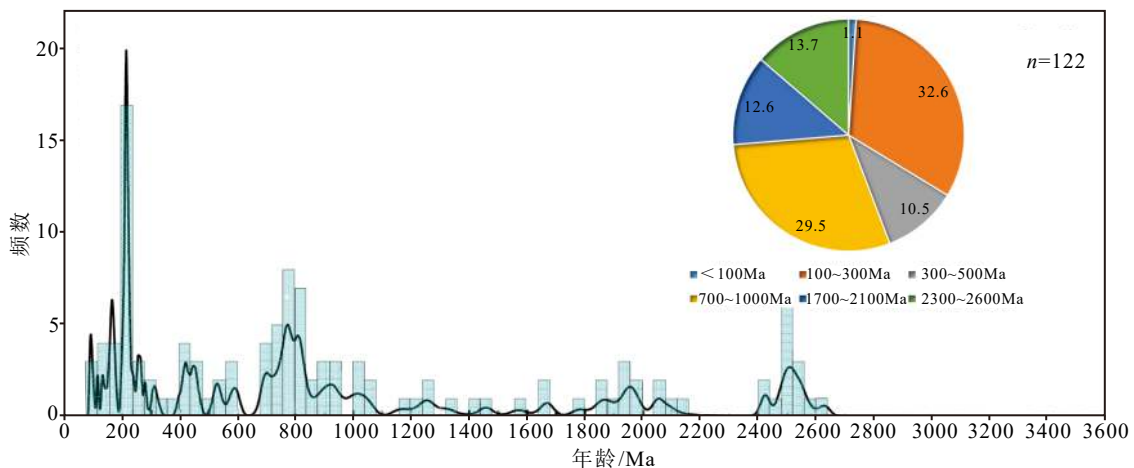


图 18 NT-DZ02 孔全新世沉积物锆石年龄分布图

Fig.18 Zircon age distribution of Holocene sediments in core NT-DZ02

特别是老黄河大量被侵蚀泥沙的影响[38]; ③辐射沙脊主体是长江系统的细砂物质, 而细粒的黏土、粉砂物质明显受到北部老黄河及南部现代长江的补给[44], 三种观点的共同点是苏北现代沙脊受到长江入海泥沙和老黄河物质的补给。NT-DZ02 孔全新世沉积物的锆石定年也显示钻孔沉积物物源与长江接近(图 18)。

### 3.2 沉积物收支平衡

沉积物收支平衡分析对于研究海陆相互作用和沉积物源汇过程具有重要意义[1,30]。根据南黄海中西部全新世沉积物厚度(图 16), 利用 Surfer 19 的体积计算功能, 计算了南黄海中西部全新世沉积物

总体积约  $1\ 086.6\ \text{km}^3$ , 沉积物密度以  $1.2\ \text{t/m}^3$  计[31], 则全新世沉积物总量约  $13.1 \times 10^{11}\ \text{t}$ (表 2)。

南黄海全新世沉积地层的物源主要包括河流源、生物源、自生矿物以及对下伏地层的侵蚀与再分配等。其中生物源和自生矿物的作用是有限的, 而河流物质和下伏地层物质的侵蚀和再分配是区域内最重要的物质来源[39]。现代黄河向海洋系统输送沉积物质的多年平均值为  $1.1 \times 10^9\ \text{t/a}$ , 而在两千年前的输沙量仅为现今输沙量的  $1/11$ [40]。全新世期间黄河输沙量为  $30.8 \times 10^{11}\ \text{t}$ , 其中仅有  $1\% \sim 15\%$  的物质可以通过渤海海峡进入黄海[41], 按照最大值计算, 则全新世以来黄河向南黄海的输沙量为  $4.62 \times 10^{11}\ \text{t}$ 。

现代长江的多年平均输沙量为  $0.5 \times 10^9\ \text{t/a}$ [40],

表 2 南黄海全新世沉积体参数特征  
Table 2 Specifications of Holocene sedimentary bodies in the South Yellow Sea

序号	沉积体名称	最大厚度/m	面积/10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup>	全新世沉积体积/km <sup>3</sup>	全新世沉积体质量/10 <sup>11</sup> t
1	山东半岛东南部沉积体	45.0	18.6	291.3	3.5
2	南黄海中部沉积体	17.7	25.7	129.6	1.6
3	老黄河口沉积体	19.9	12.1	123.5	1.5
4	苏北潮流沙脊沉积体	25.1	29.0	301.3	3.6
5	其他	10	85.3	240.9	2.9
	合计		170.7	1 086.6	13.1

全新世期间长江输沙量为  $50 \times 10^{11} \text{t}$ , 其中绝大部分沉积在河口、三角洲和浙闽沿岸泥质沉积体中, 只有约 10% 的沉积物从长江口沿江苏海岸向北<sup>[42]</sup>, 则全新世期间长江向南黄海的输沙量为  $5 \times 10^{11} \text{t}$ 。

其他汇入南黄海的河流(淮河、汉江、锦江等)现代多年平均输沙量合计为  $2.5 \times 10^7 \text{t/a}$ <sup>[43]</sup>, 参照黄河在整个全新世的输沙量, 全新世期间这些河流向南黄海的输沙总量为  $0.52 \times 10^{11} \text{t}$ 。

合计以上三部分, 全新世以来河流输运至南黄海的沉积总量为  $10.14 \times 10^{11} \text{t}$ , 占到南黄海全新世物质总量的 78%。当然这是最大化计算的结果, 即使这些物质全部进入南黄海地区, 也不排除这些物质沉积在研究区以外的沉积体中。因此, 其他来源的物质补充了上述计算中空缺的 22% 的份额, 其中生物源和自生矿物的贡献微乎其微, 而海侵过程中较强的海洋动力侵蚀、改造和再分配的底床物质是另一个重要的物质来源, 这点已经在对南黄海东南部泥质体沉积物质平衡研究中得到了证实<sup>[44-46]</sup>。

## 4 结论

(1) 南黄海中西部全新世沉积可划分为 4 个独立的沉积体, 分别位于山东半岛东南部沉积区, 南黄海中部泥质沉积区、老黄河水下三角洲沉积区和苏北潮流沙脊区, 4 个沉积体既相互独立, 在成因和机制上又有一定的关联性。

(2) 4 个沉积体呈现出不同的声学反射特征, 在山东半岛东南部, 上部亚单元为加积、进积反射, 下部亚单元为平行、亚平行反射。在南黄海中部主要表现为平行弱反射、低频率、弱振幅, 局部为透明反射层或 S 型前积层, 在老黄河水下三角洲沉积区呈现中高角度进积反射, 在苏北潮流沙脊沉积区表现为中-高角度的倾斜、S 型、斜交反射。

(3) 南黄海中西部 4 个全新世沉积体虽然物

源、成因有所不同, 但主要受到长江、黄河等河流输入物质的影响, 河流输沙量占到研究区沉积总量的 78%, 其他主要为海侵过程中较强的海洋动力侵蚀、改造和再分配的底床物质。

## 参考文献 (References)

- [1] 高抒. 中国东部陆架全新世沉积体系: 过程-产物关系研究进展评述 [J]. 沉积学报, 2013, 31 (5): 845-855. [GAO Shu. Holocene sedimentary systems over the Bohai, Yellow and East China sea region: Recent progress in the study of process-product relationships [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2013, 31 (5): 845-855.]
- [2] Li X S, Zhao Y X, Feng Z B, et al. Quaternary seismic facies of the South Yellow Sea shelf: depositional processes influenced by sea-level change and tectonic controls [J]. Geological Journal, 2016, 51 (S1): 77-95.
- [3] 张勇, 姚永坚, 李学杰, 等. 中生代以来东亚洋陆汇聚带多圈层动力下的中国海及邻区构造演化及资源环境效应 [J]. 中国地质, 2020, 47 (5): 1271-1309. [ZHANG Yong, YAO Yongjian, LI Xuejie, et al. Tectonic evolution and resource-environmental effect of China seas and adjacent areas under the multisphere geodynamic system of the East Asia ocean-continent convergent belt since Mesozoic [J]. Geology in China, 2020, 47 (5): 1271-1309.]
- [4] 秦绪文, 石显耀, 张勇, 等. 中国海域 1: 100 万区域地质调查主要成果与认识 [J]. 中国地质, 2020, 47 (5): 1355-1369. [QIN Xuwen, SHI Xianyao, ZHANG Yong, et al. Main achievements and understanding of 1: 1 million regional geological survey of China Seas [J]. Geology in China, 2020, 47 (5): 1355-1369.]
- [5] 姚永坚, 夏斌, 冯志强, 等. 南黄海古生代以来构造演化 [J]. 石油实验地质, 2005, 27 (2): 124-128. [YAO Yongjian, XIA Bin, FENG Zhiqiang, et al. Tectonic evolution of the south Yellow Sea since the Paleozoic [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2005, 27 (2): 124-128.]
- [6] 尚鲁宁, 张勇, 姚永坚, 等. 中国东部大陆边缘晚新生代构造演化及板块相互作用过程重建 [J]. 中国地质, 2020, 47 (5): 1323-1336. [SHANG Luning, ZHANG Yong, YAO Yongjian, et al. Late Cenozoic evolution of East China continental margin and restoration of plate interaction processes [J]. Geology in China, 2020, 47 (5): 1323-1336.]



- [7] Yang Z S, Liu J. A unique Yellow River-derived distal subaqueous delta in the Yellow Sea [J]. *Marine Geology*, 2007, 240(1-4): 169-176.
- [8] Wang L Y, Li G X, Xu J S, et al. Strata sequence and paleochannel response to tectonic, sea-level, and Asian monsoon variability since the Last Pleistocene in the South Yellow Sea [J]. *Quaternary Research*, 2019, 92(2): 450-468.
- [9] 韩宗珠, 王一冰, 孙苑高, 等. 黄海表层沉积物的矿物组成特征及其物源分析[J]. *海洋地质前沿*, 2022, 38(4): 10-19. [Han Zongzhu, Wang Yibing, Sun Yuangao, et al. Composition of minerals in surface sediments of the Yellow Sea and their provenance [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2022, 38(4): 10-19.]
- [10] 梅西, 李学杰, 密蓓蓓, 等. 中国海域表层沉积物分布规律及沉积分异模式[J]. *中国地质*, 2020, 47(5): 1447-1462. [MEI Xi, LI Xuejie, MI Beibei, et al. Distribution regularity and sedimentary differentiation patterns of China seas surface sediments [J]. *Geology in China*, 2020, 47(5): 1447-1462.]
- [11] Chough S K, Lee H J, Chun S S, et al. Depositional processes of late Quaternary sediments in the Yellow Sea: a review [J]. *Geosciences Journal*, 2004, 8(2): 211-264.
- [12] Liu J, Kong X H, Saito Y, et al. Subaqueous deltaic formation of the Old Yellow River (AD 1128-1855) on the western South Yellow Sea [J]. *Marine Geology*, 2013, 344: 19-33.
- [13] 王明健, 张勇, 潘军, 等. 东部海域地学大断面地质结构特征及其对综合地层分区的约束[J]. *中国地质*, 2020, 47(5): 1474-1485. [WANG Mingjian, ZHANG Yong, PAN Jun, et al. Geological structure of the large section in eastern China's sea areas and its constraint on comprehensive stratigraphic division [J]. *Geology in China*, 2020, 47(5): 1474-1485.]
- [14] 王颖, 朱大奎, 周旅复, 等. 南海海辐射沙脊群沉积特点及其演变[J]. *中国科学(D辑)*, 1998, 28(5): 385-393. [WANG Ying, ZHU Dakui, ZHOU Lüfu et al. Sedimentary characteristics and evolution of radiative sand ridges in the South Yellow Sea [J]. *Science in China (Series D)*, 1998, 28(5): 385-393.]
- [15] 王中波, 张江勇, 梅西, 等. 中国陆架海MIS5(74~128 ka)以来地层及其沉积环境[J]. *中国地质*, 2020, 47(5): 1370-1394. [WANG Zhongbo, ZHANG Jiangyong, MEI Xi, et al. The stratigraphy and depositional environments of China's sea shelves since MIS5(74-128)ka [J]. *Geology in China*, 2020, 47(5): 1370-1394.]
- [16] 杨子庚. Olduvai亚时以来南海沉积层序及古地理变迁[J]. *地质学报*, 1993, 67(4): 357-366. [YANG Zigeng. The sedimentary sequence and palaeogeographic changes of the South Yellow Sea since the Olduvai subchron [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1993, 67(4): 357-366.]
- [17] 陈志华, 石学法, 王湘芹, 等. 南海B10岩心的地球化学特征及其对古环境和古气候的反映[J]. *海洋学报*, 2003, 25(1): 69-77. [CHEN Zhihua, SHI Xuefa, WANG Xiangqin, et al. Geochemical changes in core B10 in the southern Huanghai Sea and implications for variations in paleoenvironment and paleoclimate [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2003, 25(1): 69-77.]
- [18] 庄丽华, 阎军, 常凤鸣, 等. 南海EY02-2孔碳酸盐含量特征与沉积物来源[J]. *海洋科学*, 2004, 28(1): 8-10. [ZHUANG Lihua, YAN Jun, CHANG Fengming, et al. Carbonate content character and sediment source from the core EY02-2 in the southern Yellow Sea [J]. *Marine Sciences*, 2004, 28(1): 8-10.]
- [19] 蓝先洪, 张宪军, 赵广涛, 等. 南海NT1孔沉积物稀土元素组成与物源判别[J]. *地球化学*, 2009, 38(2): 123-132. [LAN Xianhong, ZHANG Xianjun, ZHAO Guangtao, et al. Distributions of rare earth elements in sediments from Core NT1 of the South Yellow Sea and their provenance discrimination [J]. *Geochimica*, 2009, 38(2): 123-132.]
- [20] 蓝先洪, 张志珣, 李日辉, 等. 南海NT2孔沉积物物源研究[J]. *沉积学报*, 2010, 28(6): 1182-1189. [LAN Xianhong, ZHANG Zhixun, LI Rihui, et al. Provenance study of sediments in core NT2 of the South Yellow Sea [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2010, 28(6): 1182-1189.]
- [21] Liu J, Saito Y, Kong X H, et al. Delta development and channel incision during marine isotope stages 3 and 2 in the western South Yellow Sea [J]. *Marine Geology*, 2010, 278(1-4): 54-76.
- [22] 梅西, 张训华, 王中波, 等. 南海北部DLC70-3孔沉积物磁化率特征及其对古冷水团的指示[J]. *地质科技情报*, 2014, 33(5): 100-105. [MEI Xi, ZHANG Xunhua, WANG Zhongbo, et al. Magnetic susceptibility characteristic of the sediments of DLC70-3 core in northern South Yellow Sea and its significance to Paleo-cold water mass [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2014, 33(5): 100-105.]
- [23] 刘亚楠, 李官保. 南海NHH01孔周边地震地层学[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2016, 36(5): 13-19. [LIU Ya'nan, LI Guanbao. Primary study on seismic stratigraphy of the area surrounding borehole NHH01, south Yellow Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2016, 36(5): 13-19.]
- [24] 仇建东, 刘健, 张勇, 等. 南海西北部晚更新世以来的沉积环境演化[J]. *第四纪研究*, 2020, 40(3): 673-689. [QIU Jiandong, LIU Jian, ZHANG Yong, et al. Sedimentary environment evolution in the northwestern South Yellow Sea since the late Pleistocene [J]. *Quaternary Sciences*, 2020, 40(3): 673-689.]
- [25] Qiu J D, Liu J, Saito Y, et al. Sedimentary evolution of the Holocene subaqueous clinoform off the southern Shandong Peninsula in the Western South Yellow Sea [J]. *Journal of Ocean University of China*, 2014, 13(5): 747-760.
- [26] Liu J, Zhang X H, Mei X, et al. The sedimentary succession of the last ~3.50 Myr in the western South Yellow Sea: Paleoenvironmental and tectonic implications [J]. *Marine Geology*, 2018, 399: 47-65.
- [27] 刘金庆, 宋红瑛, 印萍, 等. 威海南部近岸泥质区晚更新世以来的重矿物组合特征及对物源的指示[J]. *海洋学报*, 2018, 40(3): 129-140. [LIU Jinqing, SONG Hongying, YIN Ping, et al. Characteristics of heavy mineral assemblage and its indication of provenance in the mud area off the southern coast of Weihai since the Late Pleistocene [J]. *Haiyang Xuebao*, 2018, 40(3): 129-140.]
- [28] Qiu J D, Yin P, Liu J Q, et al. Historical records of trace metals in core sediments from Jiangsu coastal area, China [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2019, 149: 110625.
- [29] 秦蕴珊, 赵一阳, 陈丽蓉, 等. 黄海地质[M]. 北京: 海洋出版社, 1989. [QIN Yunshan, ZHAO Yiyang, CHEN Lirong, et al. *Geology of*

- the Yellow Sea [M]. Beijing: China Ocean Press, 1989.]
- [30] 李佩华, 吴晓, 毕乃双, 等. 山东半岛东部近岸表层沉积物放射性核素的季节性变化及其环境指示意义 [J]. *海洋地质前沿*, 2022, 38(2): 37-47. [Li Peihua, Wu Xiao, Bi Naishuang, et al. Seasonal variation of radionuclides in surface sediments off the east coast of Shandong Peninsula and its environmental implications [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2022, 38(2): 37-47.]
- [31] Liu J P, Milliman J D, Gao S, et al. Holocene development of the Yellow River's subaqueous delta, North Yellow Sea [J]. *Marine Geology*, 2004, 209(1-4): 45-67.
- [32] 王利波. 黄海北部泥质沉积体的沉积特征 [D]. 中国海洋大学硕士学位论文, 2009. [WANG Libo. Sedimentary characteristics of the mud depositional body in the north of the Yellow Sea [D]. Master Dissertation of Ocean University of China, 2009.]
- [33] Liu J, Saito Y, Wang H, et al. Sedimentary evolution of the Holocene subaqueous clinoform off the Shandong Peninsula in the Yellow Sea [J]. *Marine Geology*, 2007, 236(3-4): 165-187.
- [34] 王忠蕾, 陆凯, 孙军, 等. 南黄海中部泥质区沉积物碎屑锆石 U-Pb 年龄物源判别 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2022, 42(5): 70-82. [Wang Zhonglei, Lu Kai, Sun Jun, et al. Detrital zircon U-Pb age and provenance discrimination in sediments of the central mud area in the South Yellow Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2022, 42(5): 70-82.]
- [35] Wang Y H, Li G X, Zhang W G, et al. Sedimentary environment and formation mechanism of the mud deposit in the central South Yellow Sea during the past 40 kyr [J]. *Marine Geology*, 2014, 347: 123-135.
- [36] 高飞. 冬季风生环流对南黄海中部泥质区形成的贡献及机制 [D]. 中国海洋大学博士学位论文, 2013. [GAO Fei. The formation and its mechanism to the muddy area in the central South Yellow Sea due to the effect of winter wind-driven circulation [D]. Doctor Dissertation of Ocean University of China, 2013.]
- [37] Li C X, Zhang J Q, Fan D D, et al. Holocene regression and the tidal radial sand ridge system formation in the Jiangsu Coastal Zone, East China [J]. *Marine Geology*, 2001, 173(1-4): 97-120.
- [38] 周长振, 孙家淞. 试论苏北岸外浅滩的成因 [J]. *海洋地质研究*, 1981, 1(1): 83-91. [ZHOU Changzhen, SUN Jiasong. On the genesis of the shoal off North Jiangsu [J]. *Marine Geological Research*, 1981, 1(1): 83-91.]
- [39] 陈珊珊, 王中波, 张勇, 等. 东海北部外陆架及邻区灾害地质体特征及成因研究 [J]. *中国地质*, 2020, 47(5): 1512-1529. [CHEN Shanshan, WANG Zhongbo, ZHANG Yong, et al. Characteristics and origin of disaster geological bodies in the northern outer shelf of the East China Sea and its adjacent areas [J]. *Geology in China*, 2020, 47(5): 1512-1529.]
- [40] Saito Y, Yang Z S, Hori K. The Huanghe (Yellow River) and Changjiang (Yangtze River) deltas: a review on their characteristics, evolution and sediment discharge during the Holocene [J]. *Geomorphology*, 2001, 40(2-3): 219-231.
- [41] Martin J M, Zhang J, Shi M C, et al. Actual flux of the Huanghe (Yellow River) sediment to the western Pacific ocean [J]. *Netherlands Journal of Sea Research*, 1993, 31(3): 243-254.
- [42] 朱大奎, 傅命佐. 江苏岸外辐射沙洲的初步研究 [M]. 北京: 海洋出版社, 1986. [ZHU Dakui, FU Mingzuo. A Preliminary Study on the Radiating Bar off the Coast of Jiangsu Province [M]. Beijing: Ocean Press, 1986.]
- [43] Yang S Y, Jung H S, Lim D I, et al. A review on the provenance discrimination of sediments in the Yellow Sea [J]. *Earth-Science Reviews*, 2003, 63(1-2): 93-120.
- [44] Park S C, Lee H H, Han H S, et al. Evolution of late Quaternary mud deposits and recent sediment budget in the southeastern Yellow Sea [J]. *Marine Geology*, 2000, 170(3-4): 271-288.
- [45] 姚政权, 刘健, 万世明, 等. 中国东部陆架第四纪沉积环境演化研究进展与展望 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2022, 42(5): 42-57. [Yao Zhengquan, Liu Jian, Wan Shiming, et al. Progress and prospects of research on the Quaternary sedimentary environment in the eastern shelf of China [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2022, 42(5): 42-57.]
- [46] 陈俊兵, 刘龙龙, 吴振, 等. 杭州湾舟山群岛海域晚第四纪声学地层 [J]. *海洋地质前沿*, 2021, 37(12): 49-57. [Chen Junbing, Liu Longlong, Wu Zhen, et al. Shallow acoustic stratigraphy of the late Quaternary in the Zhoushan Islands of Hangzhou Bay [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2021, 37(12): 49-57.]